

VÝUKA CHEMIE

JEDNODUCHÉ DEMONSTRACE INSTRUMENTÁLNÍCH METOD

IVETA ELIÁŠKOVÁ^a a JAROMÍR LITERÁK^{a,b}

^a Ústav chemie a ^b Centrum pro výzkum toxických látek v prostředí, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Kotlářská 2, 611 37 Brno
literak@chemi.muni.cz

Došlo 23.2.17, přijato 17.3.17.

Klíčová slova: instrumentální metody, demonstrační experimenty, spektroskopie, AES, GC, NMR, záblesková fotolyza

Úvod

S pokrokem přírodních věd a techniky dochází k rozšiřování mezery mezi současnou podobou těchto disciplín a tím, jak jsou prezentovány na základních a středních školách. Analytická chemie je nejčastěji představována plamenovými zkouškami, srážecími reakcemi iontů, tenkovrstvou chromatografií nebo volumetrií. V současné době se však využívají především instrumentální metody, s jejichž aplikacemi a výstupy se setkáváme v mnoha oblastech praktického života. Na první pohled by se mohlo zdát, že podstatu funkce těchto přístrojů není možné prakticky přiblížit – profesionální přístroje jsou poměrně sofistikovaná zařízení ovládaná elektronikou a s výjimkou částí určených pro uživatelskou údržbu představují i pro mnohé školené uživatele černé, přestože reálně typicky bílé, krabice. Pro potřebu škol jsou komerčně dodávány zjednodušené verze některých přístrojů, které jsou levnější, mají mnoho z funkcí „dospělých“ přístrojů, ale z hlediska názornosti se mnohdy stále jedná o kompaktní černé krabice.

V didaktické literatuře se v posledních letech objevila řada návodů na konstrukci jednoduchých sestav, které umožňují demonstrovat funkci analytických přístrojů a často s nimi dosahovat překvapivě dobrých výsledků. Setkáme se se sestavami, které mají blízko k profesionálním přístrojům, stejně jako s aparáty, jejichž konstrukce spoléhá na použití lepicí pásky.

V našem článku přinášíme stručný přehled nejzajímavějších publikovaných sestav vhodných pro domácí nebo školní pokusy. Nepodáváme zcela vyčerpávající přehled všech aparátů a ani nepopisujeme všechny detaily jejich konstrukce a fungování. Naším cílem při psaní bylo spíše referovat o nejzajímavějších sestavách a inspirovat čtenáře k samostatnému experimentování, pro které je v této oblasti stále spousta příležitostí.

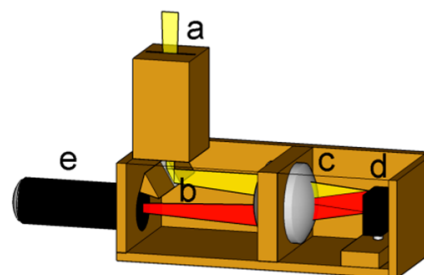
Absorpční spektroskopie ve viditelné oblasti

Návody na jednoduché aparáty pro absorpční spektroskopii byly publikovány i v poměrně daleké minulosti, ale až po přelomu století se objevuje řada zajímavě pojatých konstrukcí^{1,2}.

Kanadští autoři sestavili velmi jednoduchý spektrofotometr Littrowova typu pro viditelnou oblast spektra³, jehož uspořádání je znázorněno na obr. 1. Světlo prošlé skrze vstupní štěrbinu je odraženo zrcadlem na difrakční mřížku, která svazek rozkládá a odráží směrem k okuláru a detektoru. Před mřížkou je umístěna konvexní čočka, která kolimuje odražené světlo a promítá tak obraz vstupní štěrbinu na difrakční mřížku a současně fokusuje mřížkou rozptýlené světlo na okulár. K zachycení světla autoři použili digitální fotoaparát (běžnou zrcadlovku), který umožnil pořizovat jednotlivá spektra s vysokým rozlišením, a průmyslovou kameru, díky které bylo možné v reálném čase zobrazovat snímání spektra. Ke snímání spekter lze ale použít i webovou kameru nebo fotoaparát v mobilním telefonu, pravděpodobně s méně uspokojivými výsledky. Plášť spektrometru byl zhotoven ze dřeva, další konstrukční prvky a některé optické součástky byly zakoupeny v běžných obchodech nebo získány ze staré kopírky, okulár a nástavce pro uchycení detektoru byly pořízeny v obchodě pro astronomy.

K převedení obrazové informace z detektoru na spektrum vyzkoušeli autoři komerční program Rspec, který byl vyvinut pro zpracování astronomických pozorování a který dovoluje kontinuální konverzi obrazu z kamery na spektrum. Volně dostupnou alternativou je balíček VSPEC, případně volně dostupný (public domain) program ImageJ pro zpracování jednotlivých fotografií (spekter).

Přes jednoduchou konstrukci poskytuje tento spektrometr překvapivě dobré výsledky. Při 525 nm bylo dosaže-



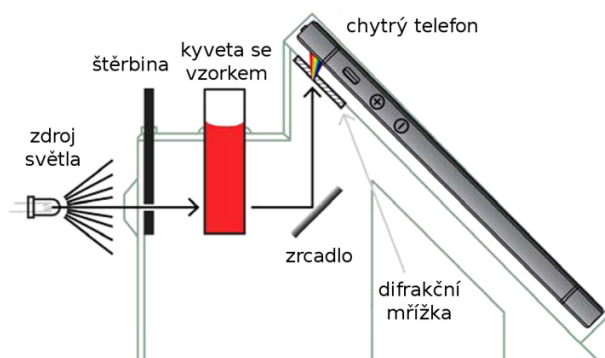
Obr. 1. Spektrometr Littrowova typu; a – vstupní štěrbinu, b – zrcadlo, c – čočka, d – difrakční mřížka, e – okulár. Reprinted with permission from Vanderveen J. R., Martin B., Ooms K. J.: J. Chem. Educ. 90, 894 (2013). Copyright 2013 American Chemical Society

no rozlišení ($R = \lambda/\Delta\lambda$) 7500 (0,07 nm). Kromě jednoduchého změření absorpčních spekter barevných roztoků autoři pozorovali vibrační strukturu viditelného spektra par jodu a byli schopni zachytit změnu intenzit jednotlivých přechodů s rostoucí teplotou.

Velmi elegantní spektrometr byl zkonstruován s využitím chytrého telefonu⁴. Schéma přístroje lze nalézt na obr. 2. Světlo z vnějšího zdroje vstupuje do spektrometru přes štěrbinu, prochází kyvetou se vzorkem a prošlý svazek je hliníkovým zrcadlem odražen na difrakční mřížku. Difrakční obraz je snímán fotoaparátem chytrého telefonu, který je na plášti spektrofotometru položen pod úhlem 45°. Plášť přístroje i vyměnitelné štěrbinové šířky byly zhotoveny 3D tiskem, soubory s podklady pro tisk autoři zveřejnili na internetu. Hliníkové zrcadlo bylo zakoupeno od specializovaného dodavatele. Jako difrakční mřížka byl použit kousek plastové folie s 1000 vrypů na milimetr, kterou lze poměrně levně zakoupit v internetovém obchodě výrobce⁵. Pro převedení obrazu na spektrum byl použit program ImageJ. Kromě měření emisních spekter různých zdrojů a absorpčních spekter ve viditelné oblasti umožňuje přístroj provádět i kvantitativní analýzu na základě Lambertova-Beerova zákona.

Byl také publikován jednoduchý spektrometr jako nástavec chytrého telefonu. Pouzdro přístroje je vyrobeno pomocí 3D tisku, klíčovým optickým prvkem je spojení Fresnelovy čočky a difrakční mřížky⁶.

Funkci difrakční mřížky mohou zastat i CD a DVD disky s hustými a do spirály uspořádanými stopami. CD disk vykazuje typicky hustotu 625 linií/mm, u DVD disku je hustota stop 1350 linií/mm, díky čemuž může DVD disk poskytnout lepší spektrální rozlišení⁷. Byl navržen jednoduchý spektrometr/spektroskop z papírové krabice, do které je pod úhlem 60° vůči dnu uchycen DVD disk⁷. Úzká vstupní štěrbinu je situována v horní stěně, pozorovací okno v boční stěně. Spektrum lze jen vizuálně pozorovat nebo případně vyfotografovat. Autoři byli schopni v tomto uspořádání rozlišit linie v emisním spektru rtuti při 577 a 579 nm. Design přístroje byl dále zdokonalen tak, že



Obr. 2. Absorpční spektrometr z chytrého telefonu. Adapted with permission from Vanderveen J. R., Martin B., Ooms K. J.: *J. Chem. Educ.* 90, 894 (2013). Copyright 2013 American Chemical Society

umožňuje registrovat světlo přicházející ze směru pozorování⁸. Přístroj byl opět papírové konstrukce a zahrnoval dodatečné hliníkové zrcadlo. K registraci obrazu byl použit kompaktní fotoaparát. Fotografie byly do podoby spektra převedeny pomocí programů pro zpracování obrazu. Přístroj umožňuje měření absorpčních spekter, autor s ním dokázal rozlišit dublet v emisním spektru sodíku (589,0 a 589,6 nm).

Na webu lze najít podobné návody na zhotovení velmi jednoduchého tubusového nástavce se vstupní štěrbinou, který lze slepit z černého papíru a spojit s chytrým telefonem, tabletem nebo webovou kamerou a který umožňuje zaznamenávat spektra⁹. Jako difrakční mřížku lze použít kousek polykarbonátového disku čtvercového tvaru z rozštípnutého DVD-R, který se zbaví vrstvy hliníku a vrstvy barviv. Nevýhody konstrukce, mezi něž patří spirálové uspořádaných vrypů na DVD-R a horší stabilita konstrukce z papíru, je vyvážena názorností a snadností, s jakou lze přístroj sestavit.

Albert a spol. sestavili z kostek stavebnice LEGO jednoduché zařízení, které funguje jako absorpční spektrometr¹⁰. Světlo bílé LED diody je kolimováno konvexní čočkou a po průchodu vzorkem v kyvetě rozloženo difrakční mřížkou. Funkci detektoru má fotodiody uchycená na otočném rameni za mřížkou. Z úhlu otočení ramene a hustoty vrypů mřížky pak lze užitím Fraunhoferovy rovnice vypočítat vlnovou délku světla, které detektor v dané pozici registruje. Spektrum je možno získat postupným otáčením ramene a měřením napětí na fotodiodě. Úhel otočení je jednoduše určován pomocí úhlooměru. Tímto způsobem bylo možné uspokojivě reprodukovat absorpční spektra roztoků některých barviv. Všechny součásti přístroje jsou snadno dostupné, včetně plastové difrakční mřížky¹¹. Poněkud zdoluhavé diskontinuální proměřování napětí pro různá otočení ramene, kdy je potřeba navíc sestavu během měření zakrýt krabicí, aby nerušilo okolní světlo, je vyváženo snadnou konstrukcí zařízení a jeho potenciálem přiblížit fungování spektrometru a difrakci světla na mřížce. Byl také vyzkoušen obdobný spektrofotometr sestavený z kostek LEGO, jehož detektor byl spojen s mikropočítačem Raspberry Pi a výsledky byly následně zpracovávány programem napsaným v jazyce Python¹².

V literatuře najdeme řadu návodů na sestavení fotometrů, které umožňují měřit transmitanci nebo absorbanci při jedné vlnové délce nebo v úzkém rozsahu vlnových délek^{13–15}. Pro jejich sestavení lze například využít stavebnice LEGO^{16,17}, 3D tisku¹⁸, byl také publikován návod na jednoduchý fotometr, jehož sondu lze ponořit do zkoumaného roztoku¹⁹. Při konstrukci těchto fotometrů se jako zdroje světla používají barevné LED diody, jako detektor může sloužit fotorezistor nebo dokonce jen druhá LED dioda. Využívá se skutečnosti, že LED dioda, na kterou dopadá světlo, jehož vlnová délka odpovídá charakteristické vlnové délce diody nebo je kratší, generuje elektromotorické napětí. K zaznamenávání signálu bývá použit digitální multimetr, případně počítačové rozhraní pro sběr analogových dat v kombinaci s programem LabVIEW.

Popsané fotometry jsou obvykle užívány k ověření Lambertova-Beerova zákona, k související fotometrické kvantitativní analýze barevných roztoků nebo k indikaci bodu ekvivalence titrací s barevným indikátorem.

Byl rovněž sestaven kompaktní fotometr schopný měřit současně transmitanci vzorku při třech vlnových délkách, kdy bylo jako detektor použito diodové pole citlivé na tři barvy a měření bylo vyhodnocováno jednoduchým osmibitovým mikrokontrolerem²⁰. Přístroj umožňoval provádět např. fotometrické stanovení potravinářských barviv nebo multikomponentní analýzu směsí barevných látek. McClain publikoval návod na fotometr, jehož elektronické uspořádání je blíže designu profesionálního přístroje²¹. Sestava je rozhraním počítače Arduino, který je naprogramován tak, aby na LCD displeji zobrazoval absorbanci vzorku.

Nutnost konstruovat pro jednoduchá fotometrická měření zvláštní zařízení lze obejít analýzou fotografií pořízených digitálními fotoaparáty za definovaných podmínek. Využívá se skutečnosti, že čip fotoaparátu registruje pro každý pixel odděleně intenzitu červeného, modrého a zeleného světla. Analýza fotografií kyvet s roztoky železité soli a fenantrolinu, které byly namíchány v různém poměru složek, umožnila studovat stechiometrii a rovnovážnou konstantu komplexační reakce²². K pořízení fotografií byl využit chytrý telefon, obraz byl zpracován pomocí skriptu pro program R. Fotografie barevných roztoků na vhodně zvoleném barevném pozadí, pořízené chytrým telefonem, byly také použity k demonstraci spektroskopie a ověření Lambertova-Beerova zákona²³. K analýze byla v tomto případě použita aplikace nainstalovaná přímo v telefonu.

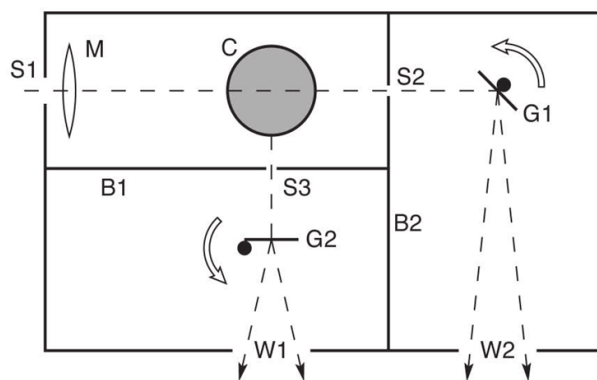
Fluorescence, záblesková spektroskopie

Bylo zveřejněno několik návodů na sestavení jednoduchých fluorimetrů. Až neuvěřitelná se zdá být nenáročná konstrukce fluorescenčního spektroskopu z krabice od bot, lupy, DVD disku a dvou tužek²⁴. Schéma sestavy je na obr. 3. Jako zdroj excitačního světla posloužila bílá LED dioda, jejíž světlo bylo kolimováno lupou za vstupní štěrbinou. Jako kyveta byla použita běžná sklenice s vodným extraktem ze žlutého zvyřazňovače, ale lze použít i jiné látky, které silně fluoreskují ve viditelné oblasti. Vnitřní prostor krabice byl rozdělen vlepenými papírovými přepážkami se štěrbinami. V kolmém směru je štěrbinou propouštějící emitované světlo na transmisní difrakční mřížku, za kterou lze obraz difrakce pozorovat oknem ve stěně krabice. Světlo prošlé sklenicí prochází dále štěrbinou a je rozloženo reflexní difrakční mřížkou. Obraz difrakce je možné pozorovat v dalším okně ve stěně krabice. Rovněž velmi jednoduchá je realizace zmíněných difrakčních mřížek – jedná se o kusy rozštípnutého DVD, polovina bez hliníkové vrstvy slouží jako transmisní mřížka, polovina s hliníkovou vrstvou jako reflexní mřížka. Obě mřížky byly přilepeny k tužkám, které procházejí víkem krabice a dovolují mřížkami otáčet.

Byly rovněž popsány jednoduché fluorescenční spektroskopy, které dovolují sledovat variabilitu intenzity emise při jedné vlnové délce. Aparáty využívají LED diodu jako zdroj excitačního světla. Vzorkem emitované světlo prochází filtrem, který propouští úzký rozsah vlnových délek a prošlé světlo je registrováno fotorezistorem nebo fotodiodou. Sestavení jednoduchého fluorimetru a naprogramování ovládání jeho komponent spolu se sběrem dat prostřednictvím programu LabVIEW bylo vyzkoušeno jako jedna z úloh ve vysokoškolském praktiku²⁵. Zařízení umožňovalo provádět experimenty mnoha druhů, např. ověření linearity detektoru, kvantitativní stanovení fluoreskujících látek, určení pK_a fluoresceinu nebo rychlostní konstanty zhášení fluorescence na základě Sternovy-Volmerovy analýzy. Byl rovněž postaven jednoduchý přenosný kompaktní fluorimetr, který posloužil ke stanovení obsahu optických zjasňovačů v papíru nebo chininu v toniku²⁶. Porter a spol. navrhli a pomocí 3D tisku vytvořili univerzální pouzdro, které dovoluje u fluorimetru popsané konstrukce různě kombinovat zdroj záření, filtry a detektor a případně uzpůsobit přístroj různým aplikacím²⁷. Autor dal také k dispozici plány na zhotovení pouzdra.

Podobně jako v případě fotometrie ve viditelné oblasti byla i pro zjištění intenzity fluorescence vyzkoušena metoda analýzy digitální fotografie²⁸. Kyvety s roztokem fluoresceinu byly postaveny na obrazovku horizontálně ležícího tabletu. Na tabletu byla zobrazena modrá obrazovka, jejíž světlo vybudilo fluorescenci fluoresceinu v roztoku. Kyvety se vzorky byly vyfotografovány a intenzita zeleného zabarvení následkem emise barviva byla určena programem ImageJ. Tímto postupem byli autoři schopni stanovit rychlostní konstantu zhášení fluorescence fluoresceinu jodidovými anionty na základě Sternovy-Volmerovy analýzy.

Byl rovněž zkonstruován složitější fluorimetr využívající chytrého telefonu s fotoaparátem a předřazené dif-



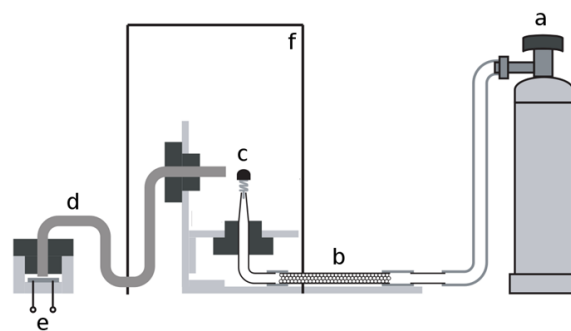
Obr. 3. Půdorysné schéma fluorimetru v krabici od bot; C – sklenice se vzorkem, G1 – otočná reflexní difrakční mřížka, G2 – otočná transmisní difrakční mřížka, M – lupa, S1 – 3 štěrbinou ve stěně a přepážkách, W1 – okno pro pozorování emisního spektra, W2 – okno pro pozorování transmisního spektra. Reprinted with permission from Farooq Wahab, M.: J. Chem. Educ. 84, 1308 (2007). Copyright 2007 American Chemical Society

rakční mřížky²⁹. Fluorimetr obsahuje složitější soustavu čoček a optického vlákna a je určen ke snímání fluorescence vzorků o malém objemu. Jako zdroj budícího světla bylo použito laserové ukazovátka zelené barvy. Autoři přístroj použili pro vyhodnocení biomolekulárních testů a konstatovali srovnatelnou nebo lepší citlivost a rozlišení ve srovnání s dostupnými komerčními přístroji.

Záblesková fotolýza je účinným nástrojem zkoumání mechanismů chemických reakcí na molekulární úrovni, což se odrazilo i v počtu Nobelových cen spojených s touto technikou. Proto nepřekvapí, že se objevují pokusy simulovat podstatu metody na jednoduchém zařízení. Již v sedmdesátých letech 20. století byl publikován návod na jednoduchou sestavu využívající zábleskové lampy jako zdroje světla pro excitaci a sledování reakce při jedné vlnové délce³⁰. Nověji najdeme několik návodů využívajících jednoduchých nástavců na kyvety, které lze vložit do komerčních UV-vis absorpčních spektrometrů s diodovým polem a které dovolují v kolmém směru excitovat vzorek silným pulzním zdrojem světla. K excitaci může sloužit blesk fotoaparátu³¹, pulzní xenonová lampa³² nebo světlo laserového ukazovátka³³. Po vybuzení molekul zaznamenává spektrometr v pravidelných časových intervalech absorpční spektra nebo absorbanci při zvolené vlnové délce. Časový rozestup mezi měřeními – obvykle v desetinách sekundy – tak limituje časové rozlišení přístroje a výběr látek, které lze v experimentu studovat. Sledovat lze např. samovolnou termickou cyklizaci otevřené formy fotocchromní spirosloučeniny³⁰ nebo zpětný přechod $Z \rightarrow E$ u derivátů azobenzenu, který následuje po fotochemické isomeraci^{32,33}.

Plynová chromatografie

Poměrně jednoduše může být demonstrována plynová chromatografie – skleněnou trubičkou naplněnou vhodným sorbentem prochází plyn, který je pak veden do kahanu, který slouží jako detektor. Celá aparatura má pokojovou teplotu, proto je vzorek před kolonu vstříkován v plynném stavu. K nástřiku slouží běžná lékařská stříkačka s jehlou, se kterou lze propíchnout přírodní pryžovou hadici a zavést vzorek do proudu plynu. Poměrně pestrá je škála popsaných náplní kolon. Byl vyzkoušen jemně rozemletý NaCl pokrytý tenkou vrstvou hexadekanu nebo parafinu^{34,35}, prací prášek (stacionární fázi jsou alkybenzenulfonové kyseliny³⁶) nebo rozdrčené přípravky proti tvorbě vodního kamene v pračce³⁷. Nosným plynem a zároveň palivem detektoru může být vodík, zemní plyn, směs propanu a butanu. Velmi často jsou tyto sestavy užívány k separaci těkavých chlorovaných rozpouštědel nebo freonů. K jejich detekci slouží Beilsteinův detektor, prakticky reprezentovaný měděnou spirálou v plameni kahanu. Hořící chlorovaná látka pak poskytuje charakteristické zelené zabarvení plamene. V jednoduchém provedení může být samostatná eluce látek pozorována jen vizuálně, intenzitu emise však lze zaznamenávat s pomocí fotorezistoru³⁷. Jednoduchý plynový chromatograf pro dělení CH_2Cl_2



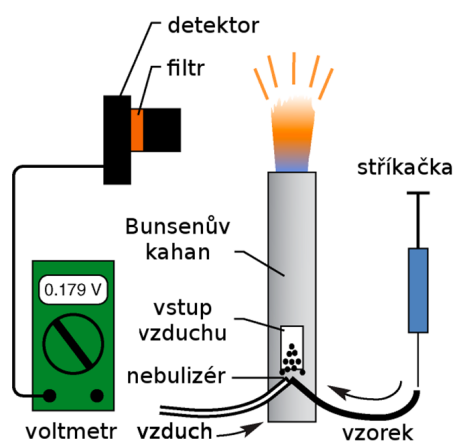
Obr. 4. Plynový chromatograf pro analýzu směsí halogenovaných rozpouštědel; a – lahev s propanem a butanem, b – náplňová kolona, c – Beilsteinův detektor, d – optické vlákno, e – fotorezistor, f – kryt detektoru. Adapted with permission from Gros N., Vrtačnik M.: J. Chem. Educ. 82, 291 (2005). Copyright 2005 American Chemical Society

a CHCl_3 s tímto detektorem je ukázán na obr. 4. Byl také popsán jednoduchý detektor, ve kterém je teplota plamene sledována infračerveným čidlem³⁸.

Na serveru YouTube lze nalézt inspirativní ukázkou inovace popsané konstrukce, kdy je náplňová kolona vložena do pláště z kovové trubky. Do pláště je foukán fénem na vlasy horký vzduch, jehož teplota je sledována teplotním čidlem. Autor chromatografickou kolonu naplnil silikagelem a jako nosný plyn použil vzduch, který je hnán provzdušňovacím čerpadlem pro akvária. Celá sestava je řízena počítačem Arduino, který rovněž sbírá data z detektoru³⁹.

Atomová emisní spektroskopie

Běžný laboratorní plynový kahan se může stát základem jednoduchého atomového emisního spektrometru. Aby se tak stalo, je potřeba rovněž zajistit vstup kapalného vzorku ve formě jemného aerosolu do plamene kahanu. Nejdříve bylo zkoušeno prosté sprejování plamene aerosolem, který vycházel z fixírky⁴⁰. Pozdější návody vedou k zavádění aerosolu z nebulizéru do přírodního otvoru pro vzduch. V literatuře najdeme návody na konstrukci jednoduchých nebulizérů z Pasteurovy pipety a plastové trubičky⁴¹, dvou trubiček, podložního sklíčka a plastové centrifugační zkumavky⁴² nebo na jejich zhotovení pomocí 3D tisku⁴³. Světlo emitované v plameni může být registrováno různými způsoby, k jeho zachycení lze využít jednoduchého spektrometru s diodovým polem, do kterého je světlo zavedeno prostřednictvím tepelně odolného optického vlákna⁴³, fotonásobiče s předřazeným monochromátorem⁴¹ nebo poměrně jednoduchým detektorem na bázi fotorezistoru nebo fotodiody a skleněného filtru, který propouští světlo v úzké oblasti, např. kolem emise sodíku^{40,42}. Jednoduchá sestava využívající tohoto typu detektoru je na obr. 5. V případě registrace emise spektrometrem lze provádět současně kvalitativní i kvantitativní analýzu. Autoři



Obr. 5. Plamenový fotometr s fotodiódou pro stanovení sodíku. Adapted with permission from LaFratta C. N., Jain S., Pelse I., Simoska O., Elvy K.: *J. Chem. Educ.* 90, 372 (2013). Copyright 2013 American Chemical Society

vesměs konstatují relativně dobrou shodu mezi naměřenými koncentracemi iontů a výsledky analýz komerčními přístroji. Omezení přístroje představuje nízká teplota plamene, která snižuje intenzitu emise a nestačí k úplné atomizaci sloučenin některých kovů. Stanovovat těmito sestavami lze především ionty kovů 1. a 2. skupiny. I bez detektoru může zařízení sloužit ke kontinuálnímu zavádění iontů kovů do plamene a delšímu pozorování jeho zbarvení.

Nukleární magnetická rezonance

I pro tak sofistikovanou metodu jako je NMR lze nalézt příklad jednoduchého a relativně snadno sestrojitelného spektrometru. Byl publikován návod na výrobu NMR spektrometru s Fourierovou transformací, který pracuje v magnetickém poli Země⁴⁴. Přístroj je rozhraním počítače Arduino. Nejobtížnější zhotovitelnou součástí přístroje je vysílací/přijímací cívka, jejíž navinutí vyžaduje profesionální instrument. Autor přístroje byl schopen naměřit NMR spektrum čisté vody, aplikovat jednoduché pulzní sekvence a změřit T_1 protonů molekul vody u vzorku piva v hliníkové plechovce, banánu a jablka.

V roce 2015 byl publikován návod na zhotovení velmi levného ^1H NMR spektrometru s Fourierovou transformací, který využívá magnetické pole silného permanentního magnetu na bázi kovů vzácných zemin⁴⁵. Sestavení elektronické části přístroje usnadňuje dostupnost levných modulárních komponent, jako jsou programovatelná hardwarová pole. Pracovní frekvence přístroje je 22,7 MHz.

Závěr

V literatuře můžeme nalézt nespočet návodů na více či méně jednoduché sestavy, které demonstrují podstatu

fungování instrumentálních metod. Jejich stavba je výrazně usnadněna rozšířením spotřební elektroniky, jakou jsou tablety a chytré telefony, 3D tiskárny, mikropočítače a jiné elektronické součástky, které mohou být jako moduly zahrnuty do jejich konstrukce. Také existuje mnoho snadno dostupných programů, které umožňují výsledky měření vyhodnocovat. Inspirativní je často invence, s jakou autoři přistupují k využívání běžných předmětů pro získání nových funkcí. Z hlediska funkčnosti popsané sestavy většinou zaostávají za komerčními instrumenty nebo přístroji určenými pro školy, jejich přidanou hodnotou je však možnost metodu si fyzicky „osahat“ a případně zažít radost z úspěšné konstrukce. Výklad, schémata ani animace nenahradí reálné experimentování, kdy dochází ke spojení názornosti a vlastní aktivity.

LITERATURA

- Safford H. W., Westneat D. F.: *J. Chem. Educ.* 30, 343 (1953).
- Scheeeline A.: *Appl. Spectrosc.* 64, 256A (2010).
- Vanderveen J. R., Martin B., Ooms K. J.: *J. Chem. Educ.* 90, 894 (2013).
- Grasse E. K., Torcasio M. H., Smith, A. W.: *J. Chem. Educ.* 93, 146 (2015).
- <https://www.rainbowsymphonystore.com/>, staženo 5. 2. 2017.
- Zhang C., Cheng G., Edwards P., Zhou M., Zheng S., Liu, Z.: *Lab Chip.* 16, 246 (2016).
- Wakabayashi F., Hamada K.: *J. Chem. Educ.* 83, 56 (2006).
- Wakabayashi F.: *J. Chem. Educ.* 85, 849 (2008).
- <https://publiclab.org/wiki/foldable-spec>, staženo 5. 2. 2017.
- Albert D. R., Todt M. A., Davis H. F.: *J. Chem. Educ.* 89, 1432 (2012).
- <http://www.edmundoptics.com/>, staženo 5. 2. 2017.
- Bougot-Robin K., Paget J., Atkins S. C., Edel J. B.: *J. Chem. Educ.* 93, 1232 (2016).
- Gordon J., James, A., Harman S., Weiss K.: *J. Chem. Educ.* 79, 1005 (2002).
- Gordon J., Harman S.: *J. Chem. Educ.* 79, 611 (2002).
- Hamilton J. R., White J. S., Nakhleh M. B.: *J. Chem. Educ.* 73, 1052 (1996).
- Asheim J., Kvittingen E. V., Kvittingen L., Verley R.: *J. Chem. Educ.* 91, 1037 (2014).
- Kvittingen E. V., Kvittingen L., Sjursnes B. J., Verley R.: *J. Chem. Educ.* 93, 1814 (2016).
- Porter L. A., Washer B. M., Hakim M. H., Dallinger R. F.: *J. Chem. Educ.* 93, 1305 (2016).
- Wang J. J., Maxwell E. J., Algar W. R.: *J. Chem. Educ.* 93, 166 (2016).
- Clippard C. M., Hughes W., Chohan B. S., Sykes D. G.: *J. Chem. Educ.* 93, 1241 (2016).
- McClain R. L.: *J. Chem. Educ.* 91, 747 (2014).
- De Moraes C. De L. M., Silva S. R. B., Vieira D. S., Lima K. M. G.: *J. Chem. Educ.* 93, 1760 (2016).
- Kuntzleman T. S., Jacobson E. C.: *J. Chem. Educ.* 93,

- 1249 (2016).
24. Farooq Wahab, M.: *J. Chem. Educ.* 84, 1308 (2007).
 25. Russ Algar W., Massey M., Krull U. J.: *J. Chem. Educ.* 86, 68 (2009).
 26. Wigton B. T., Chohan B. S., McDonald C., Johnson M. Schunk D., Kreuter R., Sykes D.: *J. Chem. Educ.* 88, 1182 (2011).
 27. Porter L. A., Chapman C. A., Alaniz J. A.: *J. Chem. Educ.* 94, 105 (2017).
 28. Koenig M. H., Yi E. P., Sandridge M. J., Mathew A. S., Demas J. N.: *J. Chem. Educ.* 92, 310 (2015).
 29. Yu H., Tan Y., Cunningham B. T.: *Anal. Chem.* 86, 8805 (2014).
 30. Chambers K. W., Smith I. M.: *J. Chem. Educ.* 51, 354 (1974).
 31. Maestri M., Ballardini R., Pina F., Melo M. J.: *J. Chem. Educ.* 74, 1314 (1997).
 32. Kosenkov D., Shaw J., Zuczek J., Kholod Y.: *J. Chem. Educ.* 93, 1299 (2016).
 33. Larsen M. C., Perkins R. J.: *J. Chem. Educ.* 93, 2096 (2016).
 34. Wollrab A.: *J. Chem. Educ.* 52, 200 (1975).
 35. Wollrab A., Doyle R. R.: *J. Chem. Educ.* 59, 1042 (1982).
 36. Bricker C. E., Taylor M. A., Kolb K. E.: *J. Chem. Educ.* 58, 41 (1981).
 37. Gros N., Vrtačník M.: *J. Chem. Educ.* 82, 291 (2005).
 38. Fox J. N., Shaner R. A.: *J. Chem. Educ.* 67, 694 (1990).
 39. <https://www.youtube.com/watch?v=HXUUPwSVDf0>, staženo 14. 1. 2017.
 40. Fragale C., Bruno P.: *J. Chem. Educ.* 53, 734 (1976).
 41. Smith G. D., Sanford C. L., Jones B. T.: *J. Chem. Educ.* 72, 438 (1995).
 42. LaFratta C. N., Jain S., Pelse I., Simoska O., Elvy K.: *J. Chem. Educ.* 90, 372 (2013).
 43. Néel B., Crespo G. A., Perret D., Cherubini T., Bakker E.: *J. Chem. Educ.* 91, 1655 (2014).
 44. Michal C. A.: *Meas. Sci. Technol.* 21, 1 (2010).
 45. Chen H. Y., Kim Y., Nath P., Hilty C.: *J. Magn. Reson.* 255, 100 (2015).

I. Eliášková^a and J. Literák^{a,b} (^a*Department of Chemistry and* ^b*Research Centre for Toxic Compounds in the Environment, Faculty of Science, Masaryk University, Brno*): **Low-cost Experiments to Demonstrate Instrumental Techniques of Analytical Chemistry**

A minireview of low-cost and hands-on experiments to demonstrate various techniques of analytical chemistry is presented. The scope was limited to absorption spectroscopy in visible part of the spectrum, fluorescence spectroscopy, flash photolysis, flame emission spectroscopy, gas chromatography and nuclear magnetic resonance.